不均質部材の確率論的構造特性評価に関する基礎的研究

京都大学工学部　正員　山田善一　　京都大学工学部　正員　家村浩和
京都大学工学部　正員　伊津野和行　京都大学大学院　学員○見坂茂範

1．はじめに

地震によって比較的軽度の被害を受けた構造物に対しては、修復補強を施して再利用する場合がある。しかし、修復前のひび割れの発生位置や大きさなどは不確定であり、このことが修復された構造物の解析を難しくしている。そこで本研究では、ひび割れにエポキシ樹脂を注入して修復されたＲＣ部材を不均質部材としてとらえ、修復をコンクリートとエポキシというように特性の全く異なる２物体の問題として考えることにより、その材質分布を確率論的に表現した。そして、修復された梁部材を、この不均質部材が一部に挿入されている部材だと考えることによってモデル化を行い、不均質部材の材質分布やその幅や位置を変化させることによって梁の曲げ剛性に与える影響を調べた。

2．１次元モデルによる剛性評価

本研究では、Fig.1及びFig.2で示されるような単純支持の梁の中央部または両端部に、コンクリートにエポキシが混ざった部材が入っているような梁（即ち中央部または両端部をエポキシ樹脂で修復している梁）を考える。このような梁の中央に集中荷重Ｐがかかったときの中央部のたわみをδ_cとする。但し、自重は考えないものとする。またエポキシを全く含まない状態のコンクリート梁の中央部のたわみをδ_0とし、そのときの部材の曲げ剛性をＥＩとすると、$E^*I=\delta_0 EI/\delta_c$で表される$E^*I$を等価剛性と定義する。Ｉの値は一定なので、等価剛性の評価としてE^*の値を評価することにする。また、以下で用いる剛性とは全てこの等価剛性のことを意味するものとする。

エポキシで修復した箇所（不均質部材）について、コンクリート中のエポキシ樹脂の分布を再生過程を用いて確率論的に表現する。コンクリートを状態１、エポキシ樹脂を状態２とする。それぞれの状態の再帰時間の確率分布は指数分布に従うとし、その平均値をμ_1，μ_2とおくと、それぞれの状態の持続時間の平均値は$1/\mu_1$，$1/\mu_2$と表せる。

このとき、状態２の発生確率の期待値は

$$\overline{p}=\frac{1}{1+\alpha}\qquad(\alpha=\mu_2/\mu_1)\qquad(1)$$

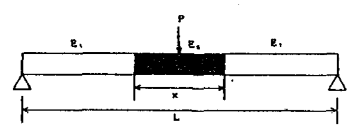

Fig.1　Model of simple beam

状態２の発生確率の分散は

$$\tilde{p}=\frac{2\alpha}{\mu_1 T\,(1+\alpha)^3}\left\{1-\frac{1}{\mu_1 T\,(1+\alpha)}\left[1-e^{-(1+\alpha)\mu_1 T}\right]\right\}$$

（Ｔは不均質部材の長さ）　　(2)　となる。

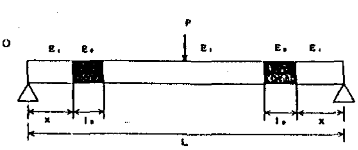

Fig.2　Model of simple beam

またコンクリート、エポキシ樹脂のヤング率の平均値、変動係数をそれぞれE_1，δ_1、E_2，δ_2とすると不均質部材のヤング率の平均値及び分散は次のようになる。

（平均値）　$\overline{E}=E_1\left[1-\overline{p}\,(1-\beta)\right]$

（分散）　$\tilde{E}=E_1{}^2\left[(1-\overline{p})^2\delta_1{}^2+\overline{p}^2\delta_2{}^2\beta^2+(1-\beta)^2\tilde{p}\right]$

但し、$\beta=E_1/E_2$とし、$\overline{p}$および$\tilde{p}$は、式(1)および式(2)により与えられる。

ここで、Fig.1及びFig.2で表されるようなモデルについていくつかのｘの値に対するαとE^*の関係をグラフで示すと、それぞれFig.3、Fig.4のようになる。Fig.3でｘ＝10mの場合とは、梁部材全体を、エポキシ

Yoshikazu YAMADA、　Hirokazu IEMURA、　Kazuyuki IZUNO、　Shigenori KENZAKA

で修復したコンクリート部材で置き換えた場合を表している。また、$\alpha=0$とは不均質部材になっている部分がすべてエポキシで置き換えられた場合を意味している。

以上の1次元モデルを用いた解析結果より次のようなことがわかった。

1. 単純梁の両端部に近い位置にエポキシを注入したときには梁全体に与える影響は非常に小さい。梁の中央部に近い位置にエポキシを注入したときはエポキシを注入する部分の長さやその割合にもよるが5%〜10%程度曲げ剛性は低下する。
2. 梁の中央部に近い位置にエポキシを注入した場合なら$\alpha=25$（コンクリート中のエポキシの存在確率が1/25）以上、また中央部付近にエポキシを注入した場合でも$\alpha=50$以上ならばエポキシが梁の曲げ剛性に与える影響はごく微小なので無視できる。
3. 梁の一部にエポキシのみの断面がある場合（つまり$\alpha=0$の断面がある場合）その幅がわずかであっても梁の剛性は大きく低下する。

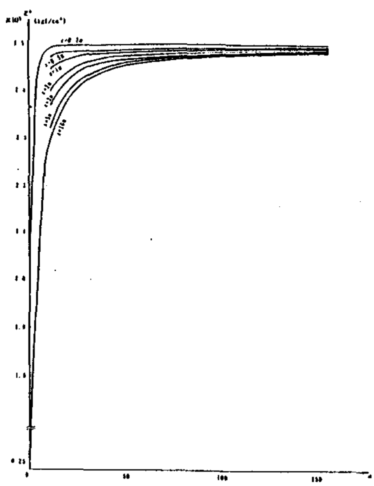

Fig. 3　α -E* (center)

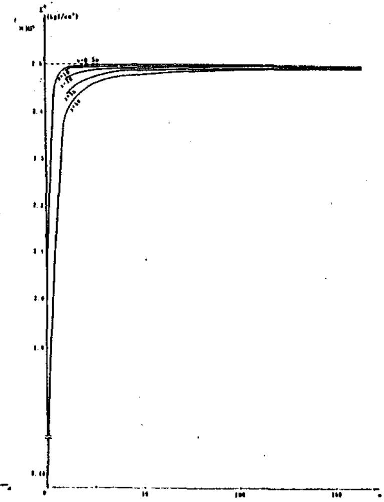

Fig. 4　α -E* (both sides)

3. 2次元モデルによる剛性評価

実際のひび割れは単純梁の場合では梁の下端に生じやすく、エポキシ樹脂で修復された梁部材の断面の材質分布も縦方向と横方向で異なる分布をとる。このような材質分布を確率論的に表現するために再生過程を2次元の方向に対して適用してみた。計算の手順は1次元のときと全く同様なので結果だけを示す。

$$\overline{p}=\sqrt{\frac{1}{(1+\alpha_1)}\times\frac{1}{(1+\alpha_2)}}$$

但し、$\alpha_1=\mu_2/\mu_1$　：横方向

$\alpha_2=\mu_2'/\mu_1'$　：縦方向

$$\widetilde{p}=\frac{\sqrt{(1+\alpha_1)\times(1+\alpha_2)}-1}{(1+\alpha_1)\times(1+\alpha_2)}\times\frac{\theta_z}{U}\frac{\theta_{z1U}}{V}\left[1-\frac{\theta_z}{2U}\left(1-e^{-2U/\theta_z}\right)\right]\times\left[1-\frac{\theta_{z1U}}{2V}\left(1-e^{-2V/\theta_{z1U}}\right)\right]$$

コンクリートとエポキシ樹脂のヤング率の平均値と変動係数をそれぞれE_1, δ_1、E_2, δ_2とすると、不均質部材全体の平均値と分散は

（平均値）　$\overline{E}=E_1(1-\overline{p})+E_2\overline{p}$

（分散）　$\widetilde{E}=E_1{}^2[(1-\overline{p})^2\delta_1{}^2+\overline{p}\,\delta_2{}^2\beta^2+(1-\beta)^2\widetilde{p}]$　　$(\beta=E_2/E_1)$

と表せる。

いくつかのα_1, α_2の値についてヤング率を計算してみた結果次のようなことがわかった。

1. 2次元モデルを用いて表した不均質部材のヤング率は平均値、分散とも1次元モデルを用いた結果とほぼ等しい値になる。
2. コンクリート中のエポキシの存在確率に方向性がない場合も方向性がある場合もヤング率はほぼ等しい値をとる。